

На правах рукописи

БАЛЕЕВА Гузель Равильевна

**РОЛЬ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА РАСТЕНИЙ**

Специальность 03.00.16 – экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

КАЗАНЬ-2004

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина».

Научные руководители: доктор химических наук,
профессор Венера Зиннатовна Латыпова

Официальные оппоненты: доктор химических наук,
профессор Михаил Иванович Евгеньев

кандидат химических наук,
доцент Эллина Владимировна Гоголь

Ведущее учреждение: Марийский государственный
технический университет

Защита диссертации состоится "23" ноября 2004 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного Совета Д 212.081.19 при Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного университета.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ, отдел аспирантуры.

Автореферат разослан "21" октября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
доктор химических наук, профессор

Г.А. Евтюгин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Растения – ведущий фактор биогеохимических процессов трансформации и миграции веществ в биосфере. Поглощая химические элементы из почвы, почвообразующих пород, грунтовых вод и атмосферы, растения выступают как активное начало биогенной миграции химических элементов в природе (Виноградов, 1952).

Растения накапливают в биомассе большой набор микроэлементов - Zn, Cu, Mn, Co, Ni, B, Mo, Cr, V, Sn, Ba, Be, Sb, As, Pb и др., многие из которых играют важную роль в метаболизме растений – выступают в качестве кофакторов многих ферментов (Ca, Fe, Mn, Cu, Co, Zn, Ni), участвуют в фотосинтезе (Cu, Mn, Co), азотном (Mo, Mn, Fe, Cu, V) и белковом (Zn, Mn) обмене, образовании биологически активных соединений (Co, B, Mo), регулируют процессы роста и развития (B, Zn, Ca) и т.д. (Микроэлементы, 1962; Школьник, 1974; Полевой, 1989; Протасова, 1998; Орлов, 1998; Жолнин, 2001, Скальный, 2004 и др.).

Элементный состав растений является лабильной величиной, на которую влияет большое количество одновременно действующих факторов (Ковалевский, 1969), условно объединенных (Алексеев, 2001) в три группы: внутренние, биохимические факторы, определяемые биологическими особенностями конкретного вида* (систематическое положение растений); внешние, ландшафтно-геохимические факторы, определяемые условиями среды обитания; внутренние, кристаллохимические факторы, определяемые свойствами ионов, входящих в состав растений. Помимо отмеченных выше природных факторов, определенный вклад в элементный состав растений вносит также и антропогенный фактор (Степанов, 2003).

Информация о роли различных факторов в формировании химического состава растений разрознена и противоречива. Для того чтобы снять эти противоречия, ранжировать факторы, определить закономерности формирования элементного состава растений, необходимы системные исследования. Подобные сведения представляют значительный теоретический и практический интерес в связи с важностью развития теоретических основ управления качеством окружающей среды, экологического нормирования и экологической безопасности территорий.

В связи с этим **целью** данной работы является выявление роли различных факторов в формировании элементного состава и биогеохимической активности растений, произрастающих в различных экологических условиях, методами полевых и лабораторных исследований с использованием единых методических подходов. В основу положены результаты проведенного систематического исследования элементного состава надземных органов древесных, кустарниковых и травянистых растений смешанных лесов юго-востока РТ и урбофитоценозов (г. Казань), а также результаты лабораторных и мелкоделяночных опытов с сельскохозяйственными культурами.

Задачи исследования:

* Соруководителем работы по эколого-биологическим вопросам является доктор биологических наук, профессор Зялатов Абдуллазян Абдулкадырович.

1. Определить валовое содержание микроэлементов (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Co, B, Be, Mo, Ag, As, Mn, V и Sn) в пробах почвы и золе растений, произрастающих в различных экологических условиях; охарактеризовать интенсивность поглощения и биогеохимическую активность растений различных фитоценозов.

2. На основе данных об интенсивности поглощения химических элементов охарактеризовать воздействие внешних факторов (содержание элемента в почве, тип почвы, тип ландшафта) на степень их поглощения фотосинтезирующими органами исследуемых растений трех ярусов.

3. Методами математической статистики выявить информативные параметры электронного строения атомов элементов для прогноза интенсивности и селективности поглощения химических элементов растениями.

4. В мелкоделяночном и лабораторном экспериментах определить роль видового и генотипического фактора растений в поглощении микроэлементов.

5. Определить закономерности распределения химических элементов по органам некоторых видов и сортов сельскохозяйственных растений; выявить пути поступления различных элементов в организм растения и биологические барьеры, регулирующие поступление элементов в растения, с использованием математических методов.

6. Разработать рекомендации по районированию сельскохозяйственных культур и их сортов в условиях полиэлементного загрязнения почв и направлениям селекции растений в целях получения незагрязненной пищевой продукции.

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина (КГУ) в рамках госбюджетной темы "Развитие теоретических и прикладных основ экологического мониторинга", № ГР 01.98.0006937, код ГАСНТИ 87.43.21, а также Программы приоритетных направлений развития науки в Республике Татарстан на 2001-2005 годы по направлению "Экологическая безопасность" (грант № 09-9.3-228/2004-Ф).

Научная новизна. Впервые математически показано принципиальное различие в интенсивности биологического накопления анионогенных и катионогенных элементов надземными органами дикорастущих растений. Интенсивность поглощения катионогенных химических элементов растениями можно прогнозировать с учетом ионного радиуса и с поправкой на коэффициент задержки корневой системой (свинец), а анионогенных элементов – с учетом энергетической константы по Ферсману и типа почв. Показана пренебрежимо малая роль растений в биогенной миграции анионогенных элементов с высокими значениями ЭК (> 31).

На базе полученных данных о содержании и интенсивности поглощения элементов надземными органами растений определена биогеохимическая активность (БХА) растений и показана зависимость последней от условий произрастания.

Впервые охарактеризованы особенности поглощения химических элементов растениями в зависимости от типа геохимического ландшафта (элювиальный, транзитный, элювиально-аккумулятивный, аккумулятивный) на примере смешанных лесов юго-востока РТ и от типа функционального использования городской территории (лесопарковый, селитебный и промышленный) на примере г. Казани.

Впервые математическими методами найдена обратная линейная зависимость между содержанием Zn и Pb в крупе гречихи и морфометрическими параметрами зерна (пленчатость и крупность).

Для интенсивно транспирирующих растений выявлен корневой барьер на пути поступления ряда элементов в надземные органы, интенсивность которого снижается в ряду: Pb-Ni-Co. Методом многопараметровой корреляции показано сопряжение барьерных функций корня и плодовой оболочки гречихи в отношении Cd.

Практическая значимость. Отдельные разделы диссертационной работы используются при чтении общепрофессиональных курсов "Экологический мониторинг", "Химия окружающей среды" и специального курса «Микроэлементы в окружающей среде» для студентов экологического факультета Казанского государственного университета по специальности 013100 – экология.

Найденные в работе закономерности аккумуляции химических элементов в фотосинтезирующих органах растений различных ярусов использованы при разработке системы критериев оценки воздействия мест размещения отходов на природные среды (тематический слой "Почва-растение").

Полученные данные о зависимости накопления и распределения элементов в органах сельскохозяйственных растений от их видовой и генотипической принадлежности переданы для практического использования в НПО "Нива Татарстана" Татарстанского НИИ сельского хозяйства и в Институт плодородия и почвоведения РАСХН.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Информативными показателями, характеризующими селективность поглощения катионогенных элементов надземными органами дикорастущих растений, является ионный радиус и коэффициент их задержки корневой системой (свинец); а анионогенных – энергетическая константа по Ферсману и тип почвы. Роль растений в биогенной миграции анионогенных элементов с высокими значениями ЭК (> 31) незначительна.

2. Биогеохимическая активность (БХА) растений, рассчитанная по данным об интенсивности поглощения элементов надземными органами, зависит от условий произрастания. Активность растений (смешанных лесов (БХА $17,5 \div 33,7$)) в целом выше, нежели определенная для растений городских территорий (БХА $10,2 \div 28,3$). БХА кустарников и липы - снижается при переходе от условий юго-востока РТ к условиям города.

3. Содержание Mn и Cu в травах и кустарниках (листья) лесопарковых зон г. Казани закономерно изменяется с увеличением их валового содержания в почве (серые лесные песчаные и супесчаные). Кустарники более «отзывчивы» на содержание Mn в почве, нежели травянистые растения. Предел поглощения меди травянистыми растениями выявляется математически при $n_x \geq 14,9$ мг/кг, для кустарников подобный предел поглощения не достигается вплоть до $n_x = 102$ мг/кг сухой почвы.

4. Средняя интенсивность поглощения ряда элементов (B, Mn, Zn, As, Cr, V и Ni) для каждой из исследуемых жизненных форм растений в целом не зависит от типа геохимического ландшафта (элювиальный, транзитный, элювиально-аккумулятивный, аккумулятивный) при сохранении индивидуальных значений

КБП. Для фотосинтезирующих органов кустарников и деревьев интенсивность поглощения Pb снижается в элювиально-аккумулятивных и аккумулятивных ландшафтах.

5. Отсутствие зависимости интенсивности поглощения металлов растениями трех ярусов, произрастающими на территории г. Казани, от типа функционального использования городской территории (лесопарковый, селитебный и промышленный) характерно для металлов с наибольшими и наименьшими величинами КБП. Интенсивность поглощения Cu и Ni растениями выше в промышленных зонах.

6. Содержание Zn и Pb в крупе гречихи посевной находится в обратной линейной зависимости от пленчатости и крупности зерна. Методом многопараметровой корреляции показано сопряжение барьерных функций корня и плодовой оболочки гречихи в отношении Cd и в меньшей степени Zn.

7. Аккумуляция элементов и закономерность их распределения по органам для каждой из исследованных культур (пшеница мягкая, горох посевной, чечевица, гречиха посевная и рапс) определяется видовой принадлежностью. Дифференциация видов по содержанию и распределению элементов более выражена для видов различных семейств, особенно в условиях повышенного содержания металлов в почве, и менее выражена для видов в пределах одного семейства (Бобовые).

8. Накопление и распределение элементов (Zn, Cu, Pb, Cd и Co) по органам (корень, стебель, лист, плодовая оболочка, крупа) гречихи посевной зависит от генотипа растений.

Личный вклад автора. Отбор проб почв и растений, их подготовка к анализу, организация лабораторных и мелкоделяночных экспериментов, анализ содержания химических элементов в почвенных вытяжках и образцах растений методом ААС, обсуждение результатов и формулирование выводов на их основе осуществлены лично автором. Соавторами статей являются научные руководители, сотрудники ИнЭПС АН РТ (В.А. Плеханова, Е.А. Михайлова), принимавшие участие в обсуждении результатов, и лаборатории экологического контроля КГУ (Е.Р. Иванова), выполнившая анализ содержания химических элементов методом АЭС.

Публикации. Основные результаты исследований изложены в 12 научных публикациях.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на Итоговой студенческой научной конференции КГУ 1998 г. (г. Казань, 1998), Международной конференции «Вопросы биоиндикации и экологии» (г. Запорожье, Украина, 1998), Итоговой студенческой научной конференции КГУ 1999 г. (г. Казань, 1999), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития прикладных исследований и пути повышения их эффективности в сельскохозяйственном производстве» (г. Казань, 2000), Итоговых студенческих научных конференциях КГУ 1998-2000 гг., Научно-практической конференции «Экологические аспекты энергетической стратегии как фактор устойчивого развития России» (г. Москва, 2001), Итоговая научная конференция КГУ (г. Казань, 2002), Итоговой конференции Республиканского конкурса научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н. И.

Лобачевского (г. Казань, 2002), VII Международной экологической конференция студентов и молодых ученых «Экологическая безопасность как ключевой фактор устойчивого развития» (г. Москва, 2003), Научно-практическая конференция студентов и аспирантов вузов г. Казани «Молодежь вузов г. Казани в решении актуальных проблем города» (г. Казань, 2003), III конференции-школе «Химия и инженерная экология» (г. Чистополь, 2003), XI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004» (г. Москва, 2004), II Международной научно-практической конференции «Экология: образование, наука, промышленность и здоровье» (г. Белгород, 2004), Научно-практической конференции «Устойчивое развитие: экологические, экономические, социальные и правовые аспекты» (г. Екатеринбург, 2004).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста, включает 24 рисунка, 30 таблиц. Состоит из введения, трех глав, выводов, приложения. Список цитированной литературы включает 325 источников, из них 108 – иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В РАСТЕНИЯХ (Обзор литературы)

В обзоре литературы дана общая характеристика микроэлементов и тяжелых металлов, источники их поступление в окружающую среду, рассмотрены физиологическая роль микроэлементов и тяжелых металлов в растениях, их токсичность, физиологическая значимость и механизмы детоксикации. Обобщены факторы, определяющие накопление микроэлементов и тяжелых металлов растениями, сведения о путях поступления химических элементов в организм растения, а также фитогеохимические параметры, используемые в решении проблем прикладной экологии

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом полевых исследований (1997 - 2000 гг.) явились растения различных ярусов, произрастающие в естественных фитоценозах на территории юго-востока Республики Татарстан (РТ) и г. Казани. Точки отбора проб приурочены к фоновым районам, различным источникам загрязнения, типам геохимического ландшафта и типам функционального использования городской территории.

Отбор проб растений проводили в соответствии с ГОСТ 17-4.4.02-84 в конце вегетационного периода. Измельченные в зерновой мельнице воздушно-сухие образцы травы, листьев и хвои текущего года озоляли поэтапно в муфельной печи (450⁰С) до получения светлой золы. Для возможности пересчета на сухую массу специально определяли зольность растений.

Содержание химических элементов (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Co, B, Be, Mo, Ag, As, Mn, V и Sn) в почве и золе растений определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии (спектрометр типа СЭ-1 на базе дифракционного спектрографа ДФС-458С и регистрирующих устройств типа ФП-4, совмещенных с ПЭВМ), на

базе аккредитованной лаборатории экологического контроля Казанского государственного университета (РОСС RU.0001.510958). .

В 2000-2003 гг. проведена серия лабораторных и мелкоделяночных экспериментов, объектами исследования в которых были сельскохозяйственные культуры (гречиха посевная, пшеница мягкая, горох посевной, чечевица, рапс).

В лабораторных опытах (1999-2000 гг.) выращивали несколько сортов гречихи (Саулык, Кама и Казанская крупнозерная) в вегетационных сосудах объемом 1 л в условиях капельной подачи питательного раствора, представляющего собой разбавленную (1:1) смесь Кноппа с добавлением смеси водорастворимых солей Zn, Cu, Ni, Co, и Cd. Опыты ставили в четырех вариантах в трехкратной повторности до начала цветения растений.

В условиях мелкоделяночного эксперимента (2000-2001 гг.) растения 12 сортов гречихи выращивали на опытных деланках Татарстанского НИИ сельского хозяйства на серой лесной почве.

В лабораторных опытах 2002-2003 гг. сельскохозяйственные культуры выращивали в вегетационных сосудах объемом 1 л на серой лесной суглинистой почве, привезенной из фонового района РТ (Вариант 1 - контроль). Каждую культуру выращивали в четырех вариантах в трехкратной повторности до начала цветения. В почву дополнительно вносили Cu, Ni и Pb в виде растворов солей в концентрации 0,5 ПДК для серых лесных почв - вариант 2, в концентрации 1 ПДК - вариант 3 и в концентрации 2 ПДК - вариант 4.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программных продуктов STATISTICA 6,0 (Боровиков и др., 1997), OriginPro 7.0 и Microsoft Excel.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1.Содержание микроэлементов в растениях, произрастающих в различных экологических условиях

В связи с поставленными в работе задачами в данном разделе приводятся результаты определения содержания химических элементов (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Co, B, Be, Mo, Ag, As, Mn, V и Sn) в дикорастущих растениях, произрастающих в различных экологических условиях: смешанные леса на территории юго-востока РТ и лесопарковые зоны г. Казани.

Анализ экспериментальных данных показывает, что независимо от яруса и вида растений максимальное содержание в золе характерно для Zn (357,0 и 331,1 мг/кг золы) и Mn (2048 и 1270,8 мг/кг золы соответственно). Это можно объяснить большим физиологическим значением этих элементов и высокой потребностью в них растений различных фитоценозов. Минимальным содержанием в золе растений г. Казани характеризуются Cr и V - элементы захвата (Перельман, 1979). По сравнению с растениями лесопарковых зон г. Казани растения смешанных лесов юго-востока РТ отличаются несколько более высоким содержанием в золе Cr, V и B, что может быть результатом известной (Озол и др., 1999) геохимической аномалии пород и почв этого региона РТ.

Превышения над кларком по Виноградову характерны для среднего содержания Zn, Cr, Pb, Mn, Cu, Cd, Ni и Co во всех растениях, а в растениях юго-

востока РТ - также и В. Соответствующие кларки по Бовену превышают содержание Cr и Co, а также Ni в растениях юго-востока РТ.

3.2. Биогеохимическая характеристика растений различных фитоценозов

3.2.1. Интенсивность поглощения

Количественной мерой интенсивности (степени) поглощения химических элементов растениями является коэффициент биологического поглощения ($КБП = I_x/n_x$) (Полынов, 1956; Перельман, 1961), представляющий собой отношение содержание (I_x) элемента в золе растений к его содержанию (n_x) в почве. С использованием результатов по содержанию микроэлементов в почвенных образцах, отобранных в соответствующих точках на территории исследуемых фитоценозов, рассчитаны значения КБП, которые существенно зависят от природы элемента и вида растения.

Для анализа зависимости от природы исследованных химических элементов, прежде всего, произведено их ранжирование по интенсивности поглощения. Были выделены следующие градации (Авессаломова, 1987):

Элементы биологического накопления ($КБП > 1$):

I группа. $КБП = 10n$ и более – элементы энергичного накопления;

II группа. $КБП = 10 - n$ – элементы сильного накопления.

Элементы биологического захвата ($КБП < 1$):

III группа. $КБП = 0, n$ – элементы слабого накопления и среднего захвата;

IV группа. $КБП = 0, 0n$ – элементы слабого захвата;

V группа. $КБП = 0, 00n$ и менее – элементы очень слабого захвата.

Как видно из таблицы 1, к элементам энергичного накопления можно отнести Zn в хвое сосны, произрастающей на юго-востоке РТ и в листьях березы с территории лесопарковых зон г. Казани ($КБП$ 10 и 10,9 соответственно). Элементами сильного накопления в большинстве случаев являются физиологически значимые для растений микроэлементы – Zn, Cu, Mo, Mn, B ($КБП=10-n$). Так же сильно накапливаются и элементы риска (Bublinec, 1992) – Pb, Cd и Ni. Слабо накапливаются Co и Cr в растениях юго-востока РТ, а в ряде случаев Ni, Mo и Pb. Элементами слабого захвата являются V для всех исследованных растений и Cr для растений г. Казани. Элементов очень слабого захвата среди исследованных найдено не было.

3.2.2. Биогеохимическая активность растений различных фитоценозов

На основе данных о КБП элементов рассчитана биогеохимическая активность (БХА) фотосинтезирующих органов исследуемых растений (табл.1).

Анализ величин БХА для растений, произрастающих в различных экологических условиях, позволяет, прежде всего, заключить, что активность растений юго-востока РТ ($БХА 17,5 \div 33,7$) в целом выше, нежели определенная для растений г. Казани ($10,2 \div 28,3$).

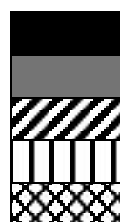
Представляет интерес анализ чувствительности БХА одних и тех же видов растений, произрастающих в различных экологических условиях. Так, если величины БХА для травянистой растительности, березы и сосны статистически не значимы, то БХА кустарников и липы снижается при переходе от условий Закамья к условиям города. Наибольшая чувствительность обсуждаемой характеристики к

условиям произрастания выявлена для липы: БХА снижается с 23,0 до 10,2 в г. Казани.

Таблица 1. Ранжирование исследованных химических элементов по интенсивности их поглощения¹⁾ дикорастущими растениями и их биогеохимическая активность

Растение	Орган	Интенсивность биологического поглощения микроэлементов по КБП											БХА	
		Zn	Cd	Pb	Cu	Mo	Ni	Cr	Co	B	V	Mn		
Растения смешанных лесов юго-востока РТ														
Травы	надз. часть													17,5
Brassica napus	надз. часть													19,9
Кустарники	листья													23,3
Деревья в т.ч.:	листья													22,1
Betula pendula	листья													30,1
Populus tremula	листья													33,7
Tilia cordata	листья													23,0
Pinus sylvestris	хвоя													19,5
Растения лесопарковых зон г. Казани														
Травы (Gramineae)	надз. часть													21,1
Кустарники	листья													15,9
Деревья в т.ч.:	листья													
Betula pendula	листья													28,3
Quercus robur	листья													18,6
Acer negundo.	листья													10,4
Tilia cordata	листья													10,2
Pinus sylvestris в т.ч.:	хвоя													24,0
1-й год куш.	хвоя													24,7
2-й год куш.	хвоя													22,5
3-й год куш.	хвоя													24,7

Примечание. ¹⁾



- элементы энергичного накопления;
- элементы сильного накопления;
- элементы слабого накопления и среднего захвата;
- элементы слабого захвата;
- элементы очень слабого захвата.

3.3. Факторы, определяющие накопление химических элементов растениями

Формирование химического состава растений происходит под влиянием большого числа генетических и экологических факторов. В данной работе, основываясь на данных по содержанию элементов в фотосинтезирующем органе растений и почве, интенсивности поглощения (КБП), а также с привлечением результатов, полученных в условиях лабораторного моделирования, оценивали воздействие следующих факторов: внешних (экологических) – тип почвы, содержание элемента в горизонте питания, тип ландшафта и внутренних (генетических) – характеристика ионов элементов, биологические барьеры поступления элементов, систематическая принадлежность растений.

3.3.1. Содержание элемента в почве

Зависимость содержания химических элементов в золе фотосинтезирующих органов растений (I_x) от их содержания в почве (n_x) наиболее детально с определением валовых и подвижных форм тяжелых металлов (Pb, Ni, Cr, Cd, Zn, Cu и Mn) исследована на примере серых лесных песчаных и супесчаных почв лесопарковых зон г. Казани. Определена степень извлечения металлов из почвенных образцов ацетатно-аммонийным буфером (pH=4,8). Каких-либо достоверных зависимостей между содержанием металлов в золе растений и содержанием их подвижных форм в почвенных вытяжках не выявлено. Для большинства исследованных проб обнаружена тенденция к росту I_x с увеличением n_x . Содержание Mn и Cu в траве и листьях кустарников достоверно ($r > r_{кр}$) связано с их содержанием в почвенном покрове. Получены следующие уравнения линейной зависимости без достижения эффекта насыщения:

Mn (травы): $I_x = 12,57 \cdot n_x - 7313,49$ ($r=0,85$; $n_x = 585 \div 610$ мг/кг сухой почвы);

Mn (кустарники): $I_x = 31,3 \cdot n_x - 17962,9$ ($r=0,74$; $n_x = 585 \div 610$ мг/кг сухой почвы);

Cu (кустарники): $I_x = 0,38 \cdot n_x + 28,86$ ($r=0,69$; $n_x = 10 \div 102$ мг/кг сухой почвы).

Содержание Cu в травянистых растениях описывается экспоненциальной зависимостью ($y = 39,83 - 21,63 \cdot e^{-\frac{x}{3,7}} - 0,11x$; $\chi^2=1,82$) с пределом поглощения Cu при $n_x \geq 14,9$ мг/кг сухой почвы. Для кустарников подобный предел поглощения Cu не достигается вплоть до $n_x = 102$ мг/кг сухой почвы.

Таким образом, полученные результаты не выявляют зависимости между содержанием элементов в растениях и содержанием подвижных форм элементов в почвенных вытяжках (для данного типа почв). Обнаруженные тенденции к росту I_x с увеличением n_x , в т.ч. и достоверные (для Cu и Mn), свидетельствуют о наличии у растений эволюционно выработанных механизмов извлечения эссенциальных элементов из корнеобитаемого слоя.

3.3.2. Тип ландшафта

Роль ландшафтно-геохимических факторов в формировании элементного состава растений исследована на примере смешанных лесов юго-восточных районов РТ, на территории которых были выделены элементарные геохимические ландшафты (элювиальный - Э, транзитный - Т, элювиально-аккумулятивный - ЭА, аккумулятивный - А) согласно классификации Б.Б. Полынова (1946) с дополнением по М.А. Глазовской (1964).

Из всего массива значений КБП выделены ассоциации микроэлементов по степени их поглощения фотосинтезирующими органами растений в зависимости от типа геохимического ландшафта. Как показано на примере территории юго-востока РТ (табл. 2), независимо от типа ландшафта, всеми растениями энергично накапливаются Mn и В, что можно объяснить их высокой биофильностью (Перельман, 1961); As, Ni, Cr и V не накапливаются растениями независимо от яруса и типа ландшафта. Незначительные вариации в составе ассоциаций элементов, характерных для разных типов ландшафтов (табл. 2), могут быть связаны с различием почвенно-геохимических условий.

Средняя интенсивность поглощения ряда элементов (В, Mn, Zn, As, Cr, V и Ni) для каждой из исследуемых жизненных форм растений в целом не зависит от типа геохимического ландшафта при сохранении индивидуальных значений КБП.

Перечисленные элементы четко делятся на две группы с предельными величинами КБП: В, Мп и Zn – элементы энергичного накопления как физиологически наиболее значимые; а также As, Cr, V и Ni – элементы слабого захвата, физиологическая роль которых не доказана.

Поглощение элементов с промежуточными величинами КБП (Pb, Cu и Mo) обнаруживает некоторую зависимость от типа ландшафта. Так, с увеличением степени поглощения Pb при переходе от травы к кустарникам и деревьям проявляется зависимость КБП от типа геохимического ландшафта с сохранением общей тенденции к снижению его в аккумулятивных ландшафтах, по-видимому, в результате характерной для Pb способности к комплексообразованию с органическим веществом почв, накапливающимся в понижениях местности, и снижения его биодоступности. Влияние типа ландшафта на интенсивность поглощения Cu и Mo по данным результатам не проявляется в виде какой-либо зависимости, по-видимому, в данных случаях имеет место более сложное воздействие также и иных факторов.

Таблица 2. Ассоциации элементов по степени их поглощения растениями, произрастающими на территории юго-востока РТ, в зависимости от типа геохимического ландшафта

Тип растительности	Тип ¹⁾ ландшафта	Интервалы КБП				
		>4	4-3	3-2	2-1	<1
Травянистая	Э	B,Mn	-	Pb,Zn,Cu	Mo	As,Ni,Cr,V
	Т	Mn	B	Pb,Zn,Mo	Cu	As,Ni,Cr,V
	ЭА	B,Mn	-	Pb,Zn,Mo	Cu	As,Ni,Cr,V
	А	B	Mn	Pb,Zn	Cu,Mo	As,Ni,Cr,V
Кустарниковая	Э	Zn,B,Mn	Pb	Cu	Ni	As,Mo,Cr,V
	Т	Zn,B,Mn	Pb	-	Cu,Mo	As,Ni,Cr,V
	ЭА	Zn,B,Mn	-	Pb,Cu	Ni,Mo	As,Cr,V
	А	Zn,Mn	B	Pb,Cu	Mo	As,Ni,Cr,V
Древесная	Э	Zn,Pb,B,Mn	-	Cu	Ni	As,Mo,Cr,V
	Т	Zn,Pb,B,Mn	-	Cu	Ni	As,Mo,Cr,V
	ЭА	Zn,B,Mn	Pb	Cu	Ni,Mo	As,Cr,V
	А	Zn,B,Mn	Pb		As,Cu,Ni	Mo,Cr,V

Примечание. ¹⁾ Обозначения в тексте.

3.3.3. Тип функционального использования территории

Город представляет собой сложную многокомпонентную и многофункциональную систему, элементы которой распределены в пространстве незакономерно (Александрова, 2004). На территории города было выделено несколько функциональных типов ее использования: лесопарковый (Л); селитебный (С); промышленный (П) (Арманд, 1988).

На основе полученных в данной работе экспериментальных данных о содержании химических элементов в образцах почв и произрастающих на них растений рассчитаны значения КБП (табл.3) и суммарного показателя загрязнения

растений ($СПЗ = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\phi i}}$), (Экогеохимия..., 1995).

Интенсивность поглощения Zn, Cd, Cr и Pb для каждого из исследуемых ярусов растительности не зависит от типа функционального использования городской территории. Как и в случае с отсутствием отклика величины КБП на тип геохимического ландшафта (раздел 3.3.2) данный случай относится к элементам с предельными величинами КБП.

Интенсивность поглощения Cu и Ni из почв выше для растений, произрастающих в промышленных зонах.

Для кустарников характерны большие величины СПЗ нежели для травянистых растений; кроме того, в пределах каждой из жизненных форм растений изменение величин СПЗ статистически не значимо.

Таблица 3. Ассоциации элементов по величине их поглощения (КБП) растениями в зависимости от типа функционального использования городской территории (г. Казань)

Тип растительности	Тип функционального использования территории	Интервалы КБП		
		КБП>1	КБП≈1	КБП<1
Травянистая	Лесопарковый	Zn, Cd, Co	Cu	Pb, Cr, Ni
	Селитебный	Zn, Cd	Cu, Co	Pb, Cr, Ni
	Промышленный	Zn, Cu, Cd	Co, Ni	Pb, Cr
Кустарниковая	Лесопарковый	Zn, Cd	Cu, Co	Pb, Cr, Ni
	Селитебный	Zn, Cd	Cu, Co	Pb, Cr, Ni
	Промышленный	Zn, Cd, Cu, Co	Ni	Pb, Cr

3.3.4. Электронное строение атомов элементов

Для выявления влияния природы химических элементов на интенсивность их поглощения надземными органами растений в данной работе проведен анализ зависимости величин КБП для дикорастущих растений смешанных лесов юго-востока РТ от таких характеристик строения атомов исследуемых элементов, как потенциал ионизации (IP), электроотрицательность (ЭО), ионный радиус (R_i), энергетическая константа (ЭК).

Прежде всего, следует поделить все исследуемые микроэлементы на катионогенные (Zn, Cd, Ag, Pb, Cu, Ni, Co, Be) и анионогенные (Mo, Sn, As, Cr, V, B, Mn) элементы, характер миграции которых в системе почва-растение различен (Перельман, 1979; Винокурова, 2002).

Отметим, что интенсивность поглощения катионогенных и анионогенных элементов растениями протекает независимо от таких параметров химических элементов, как IP и ЭО.

Представляет интерес анализ зависимости величин КБП элементов от ионного радиуса (R_i), поскольку значительная часть поглощенных элементов не только попадает в растения в ионной форме, но и распределяется в них в соответствии с особенностями ионов. Для ионов катионогенных элементов обнаружена достоверная линейная зависимость КБП - R_i .

Выведенные уравнения регрессии, характерные для естественных фитоценозов, приведены в табл. 4; в той же таблице приведены соответствующие

уравнения, рассчитанные нами с использованием литературных значений КБП (Vinokurova et al, 2001; Винокурова и др., 2002) тех же элементов.

Таблица 4. Зависимость степени поглощения (КБП) катионогенных элементов надземными органами растений некоторых фитоценозов от их радиусов (R, Å)

Вид растения	Вид регрессии	Коэффициент корреляции, r
Смешанные леса юго-востока РТ		
Травы ¹⁾	КБП = 2,54R - 0,63	0,78
Brassica napus	КБП = 7,03R - 3,11	0,53
Кустарники ²⁾	КБП = 3,91R - 0,98	0,58
Betula pendula	КБП = 7,95R - 3,26	0,62
Pinus silvestris	КБП = 7,19R - 2,24	0,56
Populus tremula	КБП = 4,58R - 1,41	0,55
Tilia cordata	КБП = 4,49R - 1,72	0,81
Растения подроста и подлеска елово-пихтовых лесов РМЭ³⁾		
Sorbus aucuparia	КБП = 4,89R - 2,22	0,67
Rhamnus frangula	КБП = 3,42R - 1,31	0,59
Evonymus verrucosa	КБП = 3,59R - 1,66	0,65
Corylus avellana	КБП = 3,43R - 1,52	0,63
Tilia cordata	КБП = 2,93R - 1,24	0,60
Acer plantanoides	КБП = 4,56R - 2,3	0,65
Picea abies	КБП = 2,55R - 0,57	0,45
Abies sibirica	КБП = 3,3R - 1,46	0,57
Древесные породы елово-пихтовых лесов РМЭ³⁾		
Picea abies	КБП = 4,45R - 1,91	0,61
Abies sibirica	КБП = 3,45R - 1,08	0,54

Примечание. ¹⁾Смешанные пробы растений травянистого яруса.

²⁾Смешанные пробы кустарниковых растений. ³⁾ РМЭ – Республика Марий Эл.

Как следует из данных табл. 4, для исследуемых катионогенных элементов наблюдается достоверный рост интенсивности поглощения элемента растениями с увеличением ионного радиуса, причем во всех случаях вклад рассматриваемого фактора является существенным. Тот факт, что Pb несколько снижает тесноту корреляционных зависимостей, объясняется эффективным связыванием его с органическим веществом почв (Брукс, 1982; Иванов, 1994), а также задержкой свинца корневой системой растений, как показано в данной работе (раздел 3.3.6) для растений с высоким коэффициентом транспирации и в некоторых литературных источниках (Винокурова и др., 2002). Значительная одревенелость толстых корней и связанная с этим низкая зольность образцов, приводит к методической ошибке в оценке корневых барьеров.

Для дикорастущих растений урбофитоценозов (на примере г. Казани) подобного типа зависимость проявляется лишь в виде некоторой тенденции, но не

является достоверной ($r > r_{\text{крит.}}$); по-видимому, она усложнена преобладающим воздействием антропогенного и других факторов.

Аналогичной зависимости КБП - R_i не наблюдается для анионогенных элементов, по-видимому, в силу того, что расчетное значение R_i для этих элементов, мигрирующих в форме анионов кислородных кислот, не отражает реального размера мигрирующей частицы.

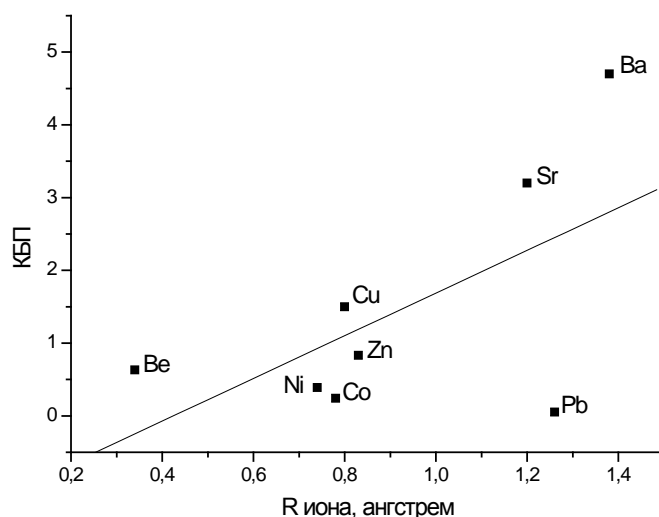


Рис. 1 Зависимость поглощения МЭ растениями от радиуса ионов (на примере *Sorbus aucuparia*).

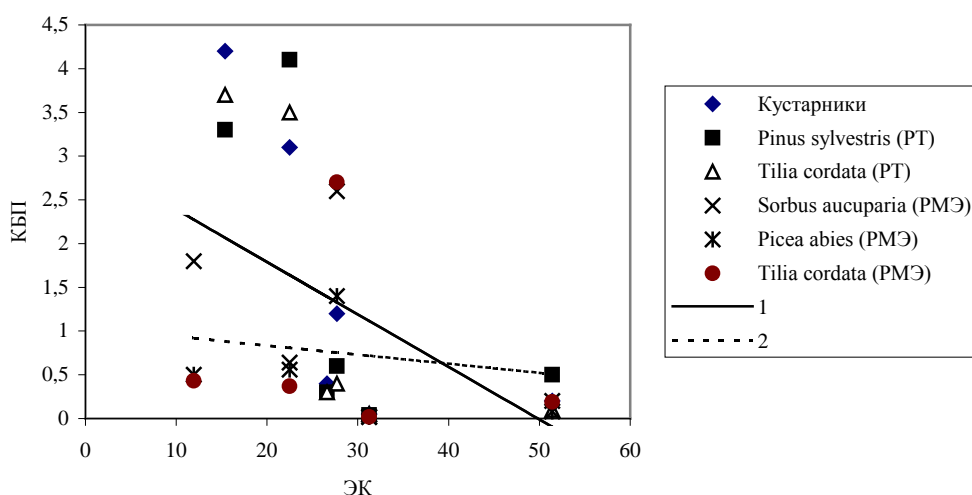


Рис. 2. Зависимость интенсивности поглощения (КБП) анионогенных элементов фотосинтезирующими органами липы сердцелистной различных фитоценозов от энергетической константы (ЭК) элементов.

1 - смешанные леса юго-востока РТ (черноземы) ($\text{КБП} = -0,06 \cdot \text{ЭК} + 2,99$).

2 - елово-пихтовые леса РМЭ (дерново-подзолистые почвы) ($\text{КБП} = -0,01 \cdot \text{ЭК} + 1,04$).

Ранее было высказано (Алексеев, 2001) предположение о снижении интенсивности поглощения химических элементов растениями по мере повышения величин их ЭК. Полученные нами результаты выявляют принципиальные различия в поглощении катионогенных и анионогенных элементов растениями смешанных лесов в зависимости от ЭК. Так, катионогенные элементы поглощаются растениями практически независимо от значения их ЭК. Что касается анионогенных элементов, то нами выявлено и количественно описано снижение интенсивности их поглощения (КБП) растениями с ростом ЭК (рис. 2).

Интенсивность поглощения анионогенных элементов растениями из черноземов (юго-востока РТ) зависит от природы элемента сильнее, нежели характерная для поглощения из дерново-подзолистых почв (РМЭ). Эти результаты, в принципе хорошо согласующиеся с типом почв и характером миграции в них анионогенных элементов (Орлов, 1985; Снакин и др., 1997), можно считать предварительными и требующими дополнительных экспериментов с различными типами фитоценозов.

Другая особенность, вытекающая из полученной зависимости (рис. 2), заключается в том, что независимо от типа почв накопление фотосинтезирующими органами дикорастущих растений (КБП $\sim 0,0n$) анионогенных элементов с высокими значениями ЭК (V, Cr) отсутствует. Последнее хорошо объясняется меньшей подвижностью и способностью к концентрированию в элювии ионов с максимальными энергетическими константами (Ферсман, 1953-1959; Перельман, 1979). Следовательно, в условиях загрязнения почв анионогенными элементами со значениями ЭК > 31 (V, Cr) опасность их накопления в надземные органы растений отсутствует. Таким образом, роль растений в биогенной миграции анионогенных элементов с высокими ЭК (> 31) ничтожно мала.

3.3.5. Видовая и генотипическая принадлежность (Мелкоделяночный и лабораторный эксперименты)

К числу внутренних факторов формирования элементного состава растений относятся также факторы, определяемые биологическими особенностями конкретного вида. В данной работе исследовалась роль видовой и генотипической (сортовой) принадлежности растений в накоплении химических элементов (Zn, Cu, Cd, Mn, Co, Ni, B, Mo, Cr, V, Sn, Ba, Be, As, Pb) в серии лабораторных и мелкоделяночных опытов.

Лабораторный эксперимент. Для выявления зависимости накопления и распределения элементов по органам растений от их видовой принадлежности в условиях вегетационного опыта изучена металлоустойчивость сельскохозяйственных культур четырех семейств: Злаковые (Gramineae) – пшеница мягкая; Бобовые (Leguminosae) – горох посевной, чечевица; Гречишные (Polygonaceae) – гречиха посевная; Крестоцветные (Cruciferae) – рапс. Данные о содержании химических элементов в органах растений, выращенных при варьировании содержания Cu, Ni и Pb в серой лесной почве позволили выявить характерные для каждой из исследованных культур особенности накопления

элементов и закономерности их распределения по органам, определяемые видовой принадлежностью.

Пшеница в наименьшей степени накапливает Zn в органах по сравнению с другими исследованными культурами. Выявлена закономерность повышенного накопления всех элементов (за исключением As, Mo и Ni) в корневой системе пшеницы, наиболее ярко проявляемая для Pb.

Рапс характеризуется наиболее низким накоплением Ag и Be в надземных и подземных органах и высоким содержанием Pb в надземной части.

Для гороха посевного и чечевицы обнаружены во многом сходные закономерности накопления и распределения по органам большинства исследованных элементов. Так, для этих культур наблюдается повышенное содержание Pb и Zn в надземных органах; однотипное распределение Cr, Mo, Co, Ni, Be, Ba и Ag по органам, а также сходная реакция на изменение содержания исследуемых металлов в почве. Тем не менее, проявляются и различия в накоплении и распределении по органам Cd, V и As.

Гречиха характеризуется повышенным содержанием большинства анализируемых элементов (Pb, Zn, V, Mn, Co, Be и Ba) в надземных органах в опытах варианта 1ПДК, по-видимому, вследствие достижения эффекта насыщения при этой концентрации. Анализ корневой системы был невозможен из-за недостаточности ее массы для взятия представительной навески.

Дифференциация видов по накоплению и распределению элементов по органам менее выражена для видов в пределах одного семейства (бобовые) и более выражена для видов различных семейств, особенно в условиях повышенного содержания металлов в почве.

В серии опытов в условиях мелкоделяночного эксперимента исследованы уровень накопления и распределение элементов (Zn, Cu, Cd, Pb и Co) по вегетативным и генеративным органам различных генотипов (сортов) гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum*), выращенной на серой лесной почве.

По среднему накоплению в вегетативных органах гречихи изученные микроэлементы можно расположить в следующий ряд: Zn (15,25) > Pb (4,19) > Cu (2,78) > Co (0,94) > Cd (0,59 мг/кг сух. массы). Соответствующий ряд, выраженный в мольных долях (Zn > Cu > Pb > Co > Cd) свидетельствует о том, что несмотря на сравнительно высокое массовое содержание Pb в растениях, количество поглощаемых растением ионов свинца меньше, нежели ионов таких физиологически значимых элементов, как Cu и Zn.

Сортовые различия существуют также и по уровню накопления Zn, Cu, Pb и Cd в зерне. Полученные результаты согласуются с литературными данными (Ильин, 1980; Климашевский, 1991; Гамзикова, 1992) о различиях в накоплении химических элементов растениями на уровне крупных систематических единиц (отдел, класс, семейство), вида и генотипа. В дополнение к этому в данной работе на примере сельскохозяйственных культур в условиях лабораторного и мелкоделяночного экспериментов получены основания для вывода о зависимости не только накопления, но и распределения элементов по органам от вида и генотипа растений.

3.3.6. Пути миграции и биологические барьеры на пути поступления металлов в системе «почва-растение»

(Мелкоделяночный и лабораторный эксперименты)

Изучение путей поступления и биологических барьеров, препятствующих избыточному накоплению токсикантов в организм растения, проводили в серии мелкоделяночных и лабораторных опытов на примере ряда сельскохозяйственных культур.

Исследовали зависимость поступления токсичных металлов (Zn, Cu, Cd, Pb, Co и Ni) в растения трех сортов гречихи (Саулык, Кама и Казанская крупнозерная) от концентрации их в модельном «почвенном растворе», т.е. в условиях устранения влияния адсорбционных свойств почвенных (субстратных) частиц (Глава 2).

Прежде всего, в эксперименте определялся транспирационный коэффициент (E), с величиной которого связан поток ионов через растение. Транспирационный коэффициент интегрирует свойства генотипа, характеризуя расход воды на создание одного грамма сухого вещества, он позволяет оценить концентрацию элемента в ксилемной жидкости. Рассматриваемые сорта гречихи различаются величиной транспирационного коэффициента: она меньше для низкорослых сортов (Саулык и Кама) и выше для высокорослого (Казанская крупнозерная) сорта (табл. 5).

Методом атомной абсорбции определяли содержание металлов (Zn, Cu, Cd, Pb, Co и Ni) в сухом веществе корня, среднее содержание в растении и в пасоке исследуемых сортов гречихи (табл. 5).

Повышенное валовое содержание Zn в органах высокорослого сорта (Казанская крупнозерная) сопряжено с высоким транспирационным коэффициентом, следовательно, можно предположить, что поступление этого элемента обеспечивается транспирационным током. К металлам, поступающим пассивно с водным током, судя по данным таблицы 3.?, можно отнести также Pb.

Таблица 5. Величина транспирационного коэффициента (E), содержание металлов (Zn, Cu, Cd, Pb, Co и Ni) в сухом веществе корня (1, мг/кг), среднее содержание в растении (2, мг/кг сухого в-ва), в пасоке (3, мг/кг) различных сортов гречихи

Сорт	E	Zn			Cu			Cd		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Саулык	310,14	35,45	32,15	114,30	17,20	15,12	48,75	6,25	3,21	10,35
Кама	328,17	35,32	28,79	107,63	18,91	11,32	34,49	6,41	3,53	10,76
Казанская крупнозерная	411,81	57,36	45,12	139,29	20,18	16,82	40,84	8,39	3,75	9,11
Сорт	E	Pb			Co			Ni		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Саулык	310,14	138,36	59,60	192,00	43,20	16,67	53,75	79,30	22,81	255,69
Кама	328,17	100,20	50,70	154,60	50,40	20,70	63,08	84,09	25,15	63,08
Казанская крупнозерная	411,81	246,31	95,30	231,30	39,10	15,29	37,13	72,50	11,79	37,13

Для характеристики депонирующих свойств корня у исследованных генотипов рассчитан коэффициент задержки (акропетальный коэффициент) как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в стебле. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты задержки металлов корневой системой гречихи различных сортов

Сорт	Zn	Cu	Cd	Pb	Co	Ni
Саулык	1,37	1,22	2,93	4,40	19,12	17,06
Кама	1,76	2,80	5,67	7,12	19,26	18,11
Казанская крупнозерная	2,10	1,65	7,11	17,00	15,89	15,10

Из данных табл. 6 видно, что физиологически значимые для растения микроэлементы Zn и Cu практически равномерно распределены по надземным и подземным органам. Большие коэффициенты задержки характерны для Pb, Co и Ni, причем корневая система сорта Казанская крупнозерная задерживает Cd и Pb в большей степени, чем у других сортов.

Для выявления других видов физиологических барьеров в организме растения в условиях мелкоделяночного эксперимента изучалось содержание Zn, Cu, Cd, Pb и Co в генеративных органах (плодовая оболочка, крупа) 12 генотипов гречихи посевной (Молва, Демская, Трояна, Чишминская, Агидель, Кама-419, Каракитянка, Ра, Молва×Казанская-309, Казанская-309×Молва, Деметра, Дикуль).

Наименьшее количество Zn накапливает сорт Каракитянка, наибольшее – сорт Молва. У сорта Ра ярко выражена барьерная функция плодовой оболочки: содержание цинка в ней в 2,6 раза превышает содержание в крупе. У остальных сортов цинк в большей степени накапливается в крупе.

Минимальное содержание Cu в крупе характерно для сорта Каракитянка, что примерно на 30% ниже среднего для всех сортов уровня. Медь примерно одинаково накапливается и в плодовой оболочке, и в крупе.

Для Pb у генотипов Молва, Каракитянка, Демская, Кама-419, Молва х Казанская-309 выявлена барьерная функция плодовой оболочки, препятствующая накоплению этого элемента в крупе. Наименьшее количество свинца в крупе зафиксировано у генотипа Молва×Казанская-309.

В случае Cd о барьерной функции плодовой оболочки можно говорить для генотипов Молва, Молва×Казанская-309, Демская, Агидель, Трояна, Кама-419. Наиболее ярко этот барьер выражен для сорта Демская, где различие между содержанием кадмия в плодовой оболочке и крупе достигает 4-х раз.

Полученные результаты позволяют рассмотреть зависимость содержания тяжелых металлов в крупе от морфометрических параметров зерна. В качестве последних выбраны крупность (масса 1000 зерен в г) и пленчатость (в %).

Значимая обратная корреляция ($r > r_{кр.}$) между содержанием элемента в крупе (C) и пленчатостью (X_1), с одной стороны, и крупностью (X_2) зерна, с другой, выявлена для Zn и Pb:

$$\text{Zn: } C = -0,513X_1 + 25,93; r = -0,42.$$

$$\text{Zn: } C = -0,538X_2 + 30,42; r = -0,76.$$

$$\text{Pb: } C = -0,582 + 16,70; r = -0,71.$$

$$\text{Pb: } C = -0,248 + 10,80; r = -0,52.$$

Влияние крупности зерна на содержание в нем Zn и Pb. может быть результатом эффекта разбавления. Найденная обратная связь содержания металлов с пленчатостью зерна подтверждает предположение о том, что плодовая оболочка выполняет в растении барьерные функции. Для Cu и Cd выявлены лишь тенденции к уменьшению их содержания в крупе гречихи с увеличением крупности зерна, т.к. исследуемые зависимости оказались математически незначимыми ($r < r_{кр.}$). С привлечением данных о содержании исследуемых элементов в вегетативных органах исследованных сортов и методов математической статистики была сделана попытка выявить возможную сопряженность работы корня и плодовой оболочки в качестве барьеров, препятствующих избыточному поступлению токсикантов в крупу. Соответствующие уравнения двухпараметровых зависимостей представлены в табл. 7.

Учитывая величину R^2 и ошибку в величине коэффициентов перед независимыми переменными а и b, искомая сопряженность работы корня и плодовой оболочки в качестве барьеров в отношении Cu и Pb в пределах ошибки не выявляется.

Таблица 7. Статистические параметры уравнения зависимости ($Y=aX_1+bX_2+c$) содержания металлов в крупе (Y) *Fagopyrum esculentum* от содержания их в корне (X_1) и плодовой оболочке (X_2)

№	Элемент	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$	$c \pm \Delta c$	R^2
1.	Zn	$-0,21 \pm 0,19$	$0,45 \pm 0,17$	$11,70 \pm 3,89$	0,76
2.	Cu	$0,24 \pm 0,20$	$0,29 \pm 0,29$	$0,40 \pm 2,46$	0,48
3.	Pb	$0,26 \pm 0,18$	$-0,060,10$	$0,22 \pm 0,08$	0,33
4.	Cd	$0,15 \pm 0,10$	$0,70 \pm 0,39$	$1,02 \pm 0,53$	0,55

Рассматриваемые зависимости значимы для Zn и Cd: в обоих случаях имеет место сопряженность барьерных функций корня и плодовой оболочки растения с определяющим вкладом задерживающей функции плодовой оболочки.

Вклад свободной составляющей в содержании Zn (ур.1, табл. 7) в крупе превышает соответствующий вклад в содержание Cd (ур.4, табл. 7). Можно предполагать, что для содержания Zn в крупе гречихи совокупный вклад обеих барьерных функций ниже, чем для содержания Cd. По-видимому, практически безбарьерное накопление Zn, играющего чрезвычайно большую роль в обмене веществ растения, определяется генетически. Наличие большего барьера на пути поступления Cd в крупу гречихи может быть составной частью адаптивных механизмов, препятствующих поступлению фитотоксичного (Степанок, 2000) металла в генеративный орган.

Для выявления физиологических барьеров растения в экстремальных условиях минерального питания был поставлен вегетационный опыт (Раздел 2). В каждом из вариантов опыта (Контроль; 0,5 ПДК; 1ПДК; 2ПДК) определяли акропетальный коэффициент (АК) и значения Е. Показано, что с увеличением концентрации Cu, Ni и Pb в почве у пшеницы снижается транспирационный коэффициент. Это можно объяснить с двух позиций: возможно, снижая водопотребление, растения препятствуют пассивному поступлению элементов с

водным током и тем самым предотвращают их избыточное накопление в тканях. Кроме того, повышенное содержание металлов в почве увеличивает образование в растении гидрофильных белков и этим повышает их засухоустойчивость (Васильева, 1963; Боженко, Школьник, 1963; Гусейнов, Гусейнов, 1963, Dajić et al., 1996; Stikić et al., 1996). Для остальных культур водопотребление увеличивается с ростом содержания металлов в почве.

Наиболее сильно протекторная роль корня по отношению к повышенным концентрациям Pb выражена у пшеницы. Начиная уже с варианта 0,5ПДК, Pb практически не накапливается в надземной части. Большие значения АК наглядно показывают, что весь Pb концентрируется в корневой системе пшеницы, и лишь незначительная его часть поступает в надземные органы. В контрольном варианте содержание Pb в надземной части больше, чем в остальных, следовательно, защитные механизмы корня усиливаются с ростом содержания токсиканта в почве.

Для культур, относящихся к семейству Бобовых (горох посевной, чечевица), закономерности однотипны: максимальные значения АК этих культур характерны для Ni и Pb, причем барьерная функция корня усиливается, а водопотребление снижается с ростом содержания металлов в почве.

У рапса обнаружена защитная функция корня по отношению к Pb с ростом содержания металлов в почве; в отношении Cu и Ni в опытных вариантах барьерная функция угнетена в сравнении с контролем.

3.4. Рекомендации по снижению накопления металлов в продукции растениеводства

Полученные результаты о степени накопления химических элементов в органах различных растений положены в основу предлагаемых рекомендаций по районированию сельскохозяйственных культур и их сортов в условиях загрязнения почв химическими элементами, направлениям селекции с целью получения незагрязненной пищевой продукции.

ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментальных данных о содержании микроэлементов (Zn, Cu, Cd, Mo, Co, Ni, Mn, Sn, Cr, Pb, B, V, Ag) в фотосинтезирующих органах растений смешанных лесов юго-востока РТ и г. Казани и интенсивности биопоглощения элементов охарактеризована биогеохимическая активность (БХА) растений трех ярусов в зависимости от условий произрастания: биогеохимическая активность растений смешанных лесов (БХА $17,5 \div 33,7$) в целом выше, нежели определенная для растений городских территорий (БХА $10,2 \div 28,3$); БХА для травянистой растительности, березы и сосны статистически незначимы, а для кустарников и липы - снижается при переходе от условий юго-востока РТ к условиям города.
2. На примере лесопарковых зон г. Казани, сложенных серыми лесными песчаными и супесчаными почвами, показано, что содержание тяжелых металлов (Pb, Ni, Cd, Cr, Zn) в фотосинтезирующих органах растений практически не зависит от содержания подвижных форм в почвенном покрове, а для большинства исследованных металлов и для валового содержания; выявлена лишь достоверная тенденция ($r > r_{кр}$) к увеличению содержания Mn и Cu с ростом их валового

содержания в почвенном покрове для трав и кустарников, причем кустарники более «отзывчивы» на содержание Mn в корнеобитаемой зоне, нежели травянистые растения. Предел поглощения меди для травянистых растений выявляется при $n_x \geq 14,9$ мг/кг сухой почвы, для кустарников подобный предел поглощения не достигается вплоть до $n_x = 102$ мг/кг сухой почвы.

3. Средняя интенсивность поглощения ряда элементов (B, Mn, Zn, As, Cr, V и Ni) для каждой из исследуемых жизненных форм растений в целом не зависит от типа геохимического ландшафта (элювиальный, транзитный, элювиально-аккумулятивный, аккумулятивный) при сохранении индивидуальных значений КБП: B, Mn и Zn – элементы энергичного накопления как физиологически наиболее значимые и As, Cr, V и Ni – элементы слабого захвата, физиологическая роль которых не доказана. Характерная зависимость выявлена для Pb: если для травянистых растений зависимости от типа ландшафта нет, то для кустарников и деревьев интенсивность поглощения снижается в элювиально-аккумулятивных и аккумулятивных ландшафтах. Влияние типа ландшафта на интенсивность поглощения Cu и Mo не проявляется в виде какой-либо зависимости в силу более сложного воздействия также и иных факторов.

4. Интенсивность поглощения Zn, Cd, Cr и Pb для каждого из исследуемых ярусов растительности, произрастающей на территории лесопарковых зон г. Казани, не зависит от типа функционального использования городской территории. Эти элементы делятся на две группы с предельными величинами КБП: Zn и Cd с КБП > 1 и Cr и Pb с КБП < 1. Интенсивность поглощения Cu и Ni из городских почв выше для растений, произрастающих в промышленных зонах, для Co какой-либо закономерности не выявляется.

5. Математически выявлено принципиальное различие в интенсивности биологического накопления анионогенных и катионогенных элементов фотосинтезирующими органами дикорастущих растений. С использованием метода регрессионного анализа показано, что интенсивность поглощения катионогенных химических элементов растениями можно прогнозировать с учетом ионного радиуса и с поправкой на коэффициент задержки корневой системой (например, свинец), а анионогенных элементов – с учетом энергетической константы по Ферсману и типа почв. Роль растений в биогенной миграции анионогенных элементов с высокими ЭК (> 31) ничтожно мала.

6. Для каждой из исследованных культур (пшеница мягкая, горох посевной, чечевица, гречиха посевная и рапс) характерны индивидуальные особенности накопления элементов и закономерности их распределения по органам, определяемые видовой принадлежностью. Дифференциация видов по накоплению и транслокации элементов в органы в условиях лабораторного опыта более выражена для видов различных семейств, особенно в условиях повышенного содержания металлов в почве и менее выражена для видов в пределах одного семейства (Бобовые).

7. Установлена линейная зависимость между содержанием тяжелых металлов (Zn и Pb) в крупе гречихи и морфометрическими параметрами (пленчатость, крупность) зерна: с увеличением пленчатости, а также крупности зерна содержание Zn и Pb в крупе закономерно снижается.

8. Накопление и распределение элементов (Zn, Cu, Pb, Cd и Co) по органам (корень, стебель, лист, плодовая оболочка, крупа) гречихи посевной зависит от генотипа растений, как показано в условиях мелкоделяночного эксперимента.
9. В отличие от Co и Ni, поступление Zn и Pb в гречиху осуществляется пассивно и сопряжено с водным током. Для интенсивно транспирирующих растений выявлен корневой барьер на пути поступления ряда элементов в надземные органы, интенсивность которого снижается в ряду: Pb-Ni-Co. Методом многопараметровой корреляции показано сопряжение барьерных функций корня и плодовой оболочки гречихи в отношении Cd.
10. Предложены рекомендации по районированию сельскохозяйственных культур и их сортов в условиях загрязнения почв химическими элементами, направлениям селекции с целью получения незагрязненной пищевой продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Валеева Г.Р. О сортовых особенностях транслокации тяжелых металлов у гречихи / В.А. Плеханова, Г.Р. Валеева, А.А. Зялалов, Ф.З. Кадырова // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития прикладных исследований и пути повышения их эффективности в сельскохозяйственном производстве» – Казань: РИЦ «Школа», 2001. – с. 142.
2. Валеева Г.Р. Особенности транслокации ряда тяжелых металлов у трех сортов гречихи / Г.Р. Валеева, В.А. Плеханова // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития прикладных исследований и пути повышения их эффективности в сельскохозяйственном производстве» – Казань: РИЦ «Школа», 2001. – с. 324 - 326.
3. Валеева Г.Р. Сортовые особенности гречихи в водообмене и поглощении ряда тяжелых металлов / Г.Р. Валеева, А.А. Зялалов // Молодые ученые России об экологии. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2001. – с.149 – 161.
4. Валеева Г.Р. В.И.Вернадский как основатель биогеохимии / Г.Р. Валеева // Научное наследие В.И.Вернадского в контексте глобальных проблем цивилизации. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2001. – с.337-339.
5. Валеева Г.Р., Михайлова Е.А., Зялалов А.А. Исследование энергетического баланса и экологической безопасности растениеводства в аспекте проблемы устойчивого развития / Г.Р. Валеева, Е.А. Михайлова, А.А. Зялалов // Доклады конференция «Стратегии устойчивого развития». – Дубна, 2001.
6. Валеева Г.Р. Фенотипические и генотипические особенности транслокации минеральных элементов в растения рода *Fagopyrum* / Г.Р. Валеева // Тезисы Итоговой научной конференции студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского. – Казань, 2002.
7. Валеева Г.Р. Экологическое состояние почв г. Казани / Г.Р. Валеева // Сборник материалов научно-практических конференций студентов и аспирантов вузов г. Казани, участников конкурса научных работ на соискание именных стипендий Главы администрации г. Казани за 2002 и 2003 годы. – Казань, 2003. – с. 15-18.
8. Валеева Г.Р. Руководство к комплексной экологической практике по почвоведению и биогеохимии (Учебно-методическая разработка) / В.З. Латыпова, Д.В. Иванов, С.Ю. Селивановская, Г.Р. Валеева. - Казань: КГУ, 2003. – 34 с.

9. Валеева Г.Р. Элементный состав и токсичность почвенного покрова лесопарковых зон урботерриторий / В.З. Латыпова, А.В. Токарев, Г.Р. Валеева, Н.Ю. Степанова // Матер. XVII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: "Биомолекулярная химия и биотехнология". - Казань, 2003. – Т.4.- с.262.
10. Валеева Г.Р. Экологическое состояние почв г. Казани / Г.Р. Валеева // Тезисы докладов XI Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004». – М.: МГУ, 2004. – С. 19-20.
11. Валеева Г.Р. Закономерности формирования микроэлементного состава растений на территории г. Казани / Г.Р. Валеева, В.З. Латыпова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - № 8. – 2004. – С. 37-39.
12. Валеева Г.Р. Исследование металлоустойчивости сельскохозяйственных культур в целях разработки теоретических основ производства экологически безопасной продукции растениеводства / М.Ш. Сибгатуллина, Г.Р. Валеева // Тезисы докладов студенческой научно-практической конференции «Устойчивое развитие: экологические, экономические, социальные и правовые аспекты». – Екатеринбург: ОАО «Полиграфист, 2004. – С. 27.